

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04278

研究課題名(和文) 3次元コンプライアント・メカニズムによるマイクロシステムの構築手法

研究課題名(英文) Fabrication Method for Micro Systems by Using 3-Dimensional Compliant Mechanism

研究代表者

長澤 純人 (Nagasawa, Sumito)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：30400279

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロロボットなどの可動部分を有するマイクロシステムでは、部品の組立てが困難である。小さい部品を把持しながら、目的の取付場所で、方向を合わせながら組立てなくてはならない。この問題の解決手法として、やわらかい変形部とかたい構造部を一体化して設計するコンプライアント・メカニズムが提唱されており、部品の組立てを簡単化できる。

MEMS(微小電気機械システム)を応用して、マイクロシステムで利用できる3次元コンプライアント・メカニズムを実現した。このコンプライアント・メカニズムによる小型6足ロボットなどを試作・評価している。研究期間では査読付国際論文5件、国際学会9件、国内学会10件で発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果の学術的意義はマイクロシステムの部品組立を簡単化するコンプライアント・メカニズムの設計手法とMEMSによる製造プロセスを確立したことである。センサやアクチュエータなどを含めた集積化も実施した。

本研究の製造プロセスでは、真空プロセスが不要でプロセス時間が短縮されるため、設計変更が容易である。例えば医療用マイクロシステムではカスタマイズの容易さ・迅速さは大きなメリットである。飲む胃カメラシステムやカテーテル手術用器具など、利用者の身体的特徴や必要な検査に応じて、筐体サイズや形状、センサやアクチュエータ、バッテリー容量等を最適設計でき、それがすぐに利用者の下に届く便利なシステムが期待できる。

研究成果の概要(英文)：In micro systems that have moving joints such as a micro robot, assembling parts is difficult. When assembling micro systems, grasping such small parts tightly, alignment them to correct position and direction are necessary. As a solution to this problem, a compliant mechanism that integrates soft deformed parts and hard structural parts has been proposed, and it makes the small parts assembling simple.

Using MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) techniques, a three-dimensional compliant mechanism that can be used in a micro system was realized. A small 6-legged robot using this compliant mechanism was designed and evaluated.

During the research period, 4 peer-reviewed international papers were published and presentations in 9 international conferences and 10 domestic conferences were performed.

研究分野：MEMS, ロボティクス, メカトロニクス

キーワード：マイクロロボット コンプライアント・メカニズム MEMS 折り紙構造 形状記憶合金アクチュエータ 積層型静電容量角度センサ ポリマーアクチュエータ

1. 研究開始当初の背景

マイクロロボットなどの可動部分を有するマイクロシステムでは、部品の組立てが困難である。小さい部品を組み付けるためには、部品をしっかりと把持しながら、目的の取り付け場所での精密な位置決めと方向合わせが必要である。組み付けにネジなどの締結部品が必要な場合、その手間は更に大きくなる。

この問題の解決手法の一つとして、コンプライアント・メカニズムが提唱されてきた。コンプライアント・メカニズムは弾性変形部（部材を細く・薄くしたり、低剛性材料を使用する）で構造部（部材を太く・厚くしたり、高剛性材料を使用する）を連結して、最初から一体化した状態で作成されるメカニズムである。微細構造を作成する MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 技術では、2次元コンプライアント・メカニズムはマイクロシステムの重要設計手法である。集積電子回路技術から発展した MEMS 製造プロセスは、2次元の微細構造を同じ品質で大量に製作することに適している。

一方で3次元のコンプライアント・メカニズムは3Dプリンタを用いた実施報告があるが、目的とする可動領域を探索的手法で実現するものであり、汎用的な設計は難しい。MEMS技術を用いた手法では、折り上げ構造によって3次元構造を作成する手法はよく検討されているが、多自由度に可動するヒンジとしての機械的機能の実現は新しいチャレンジである。

2. 研究の目的

本研究の目的はMEMSによる折り上げ構造体に、柔軟な素材による弾性変形部を埋め込み、3次元コンプライアント・メカニズムを実現することである。折り上げるだけで3次元コンプライアント・メカニズムが実現できれば、マイクロシステムの組立ては非常に簡素化され、組み立てコストを劇的に削減できる。本研究では以下の3項目の実施により、MEMS 3次元コンプライアント・メカニズムを実現する。図1に本研究の目的と波及効果を示す。

- (1) MEMS 3次元コンプライアント・メカニズムの製造プロセスの確立
- (2) MEMS 3次元コンプライアント・メカニズムの機械的特性の評価
- (3) MEMS センサやアクチュエータとの親和性の検証

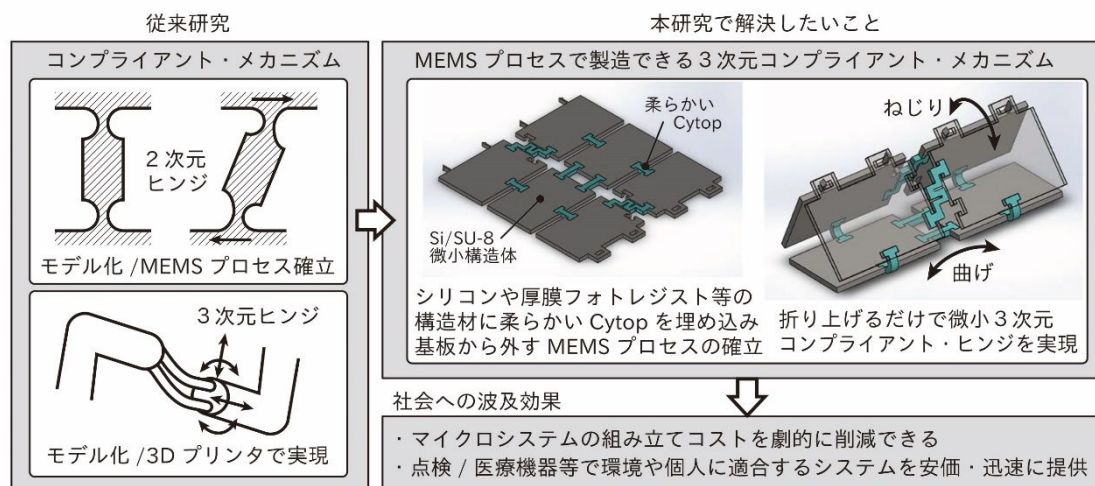


図1 本研究の目的と波及効果

3. 研究の方法

本研究で実施する3項目の研究手法は以下のとおりである。

- (1) MEMS 3次元コンプライアント・メカニズムの製造プロセスの確立
折り上げ構造体を製作する MEMS プロセスを基本プロセスとする。構造部を SU-8 等の厚膜フォトレジストで作成すれば、真空プロセスが不要になるので製造プロセスは簡単になる。製造プロセス時間が短縮されるため、設計変更なども容易に行えるようになる。
- (2) MEMS 3次元コンプライアント・メカニズムの機械的特性の評価
機械特性評価には、運動学的に動作軌跡解析が容易な4節リンク機構を用いる。作成したコンプライアント・メカニズムによる4節リンクの動作範囲、曲げ・ねじり剛性を測定・評価する。コンプライアント・メカニズムによる6足歩行マイクロロボットを試作し、歩容パターンや位相余裕など歩行歩容評価を行う。

(3) MEMS センサやアクチュエータとの親和性の検証

試作したコンプライアント・メカニズムを駆動するアクチュエータとして、形状記憶合金 (SMA: Shape Memorized Alloy) を適用する。駆動領域評価 (動作軌跡と設計軌跡の比較)、SMA の非線形動特性 (温度 vs. 変位ヒステリシス等) の補償制御系、SMA の応答特性評価 (加熱・冷却制御による応答時間の短縮化) を実施する。折り上げ型の積層静電デバイスは、折り紙構造体との親和性が高く、コンプライアント・メカニズムの角度変化によって、静電容量が変化するので駆動角を測定する角度センサとなる。この積層静電センサを MEMS プロセスで試作し、小型 6 足歩行ロボットに SMA と積層静電センサを組み込み、総合評価を行う。

4. 研究成果

(1) MEMS 3 次元コンプライアント・メカニズムの製造プロセスの確立

2019 年度には折り紙構造によるコンプライアント・メカニズムの構成方法を確立した。定量的なコンプライアント・メカニズムの評価実施のため、製造プロセスは安定した弾性特性を持つポリプロピレンシートを利用し、1 枚の平面展開図から複雑な可動構造を持つコンプライアント・ヒンジを試作・評価した (日本機械学会検口ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019 で発表) さらに、MEMS プロセスによる小型 6 足歩行ロボットの全体フレームを、折り紙構造によるコンプライアント・メカニズムで設計・試作することに成功した (Int. Microprocesses and Nanotechnology Conf.2019 で発表, Asamura, Nagasawa, JJAP, 2020)。

2020 年度にはシリコン、SU-8、フォトニスなどの MEMS で用いられるプロセス用材料による折り紙構造を検討したが、COVID-19 による大学入構制限のためにプロセス作業を進めることができなかった。このため折り紙フレームにアクチュエータやセンサ、組込 MPU などの電気システムの統合を進め、図 2 に示す小型 6 足歩行ロボットなどを試作・評価した (Int. MNC2020 で発表, Jap. Jour. Appl. Phys. 2021 国際論文)。

2021 年度にはポリイミドを基板としたフレキシブル基板 (FPC) 上に SU-8 を用いた MEMS プロセスによって、より小型に、簡単に組み立てられる小型 6 足歩行ロボットを試作した (Int. MNC2021 で発表)。

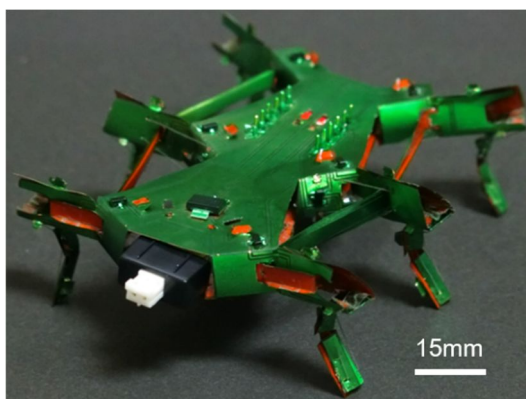


図 2 コンプライアント・メカニズムによるロボットフレームと制御回路・アクチュエータが集積化された小型 6 足歩行ロボット (Asamura, Nagasawa, Jap. Jour. Appl. Phys. 2021)。

(2) MEMS 3 次元コンプライアント・メカニズムの機械的特性の評価

2019 年度には 2 次元コンプライアント・ヒンジの詳細な画像解析から、曲げられた角度によってヒンジの回転中心が遷移することがわかった。リンク機構を設計するため、この中心遷移特性を数理モデル化した。リンク機構の基本となる 4 節リンク機構に関して、本モデルの有効性を確認した。

2020 年度にはコンプライアント・ヒンジの機械的特性を解析して、一般的なリンク機構の設計手法を確立するためにコンプライアント・ヒンジによるリンク機構の数理モデル化・3 次元 CAD モデル化を進めた (ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020 で発表)。

(3) MEMS センサやアクチュエータとの親和性の検証

2019 年度にはコンプライアント・メカニズムの駆動手法として SMA (形状記憶合金ワイヤ) を導入した。応答特性・消費電力特性に関して試作・検討した (日本機械学会検口ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019 で発表)。PWM 加熱条件などを工夫し、消費電力を抑えながらも 2 秒以内の応答を実現した。

2020 年度にはヒンジ部の角度センサとして、積層型静電容量センサを提案、試作・評価した。本センサは折り紙構造と同じ手法によって作成されるため、ロボットフレームと同時に作り込むことができる。駆動アクチュエータである SMA (形状記憶合金) は 4 個のシステム変数と非線形特性を持つため、関節部の角度は直接的に測定できることが望ましく、フレームと一体化しての積層型静電容量型の角度センサの試作評価で角度フィードバック制御が可能であ

ることを確認した (Int. MNC2020 で発表, Jap. Jour. Appl. Phys. 2021 国際論文)

2021 年度には積層型静電容量型の角度センサと SMA を折り紙構造のロボットフレームと一体化し, 実際にロボットに組み込むことができる関節ユニットとして統合した (Int. MNC2021 で発表). 折り紙構造に適したポリマーアクチュエータによる自動折り上げ機構の試作 (Int. MNC2021 で発表), SMA の任意角度制御のための SMA 抵抗値フィードバック制御手法など, コンプライアント・メカニズムとセンサ・アクチュエータの統合・評価を進めた.

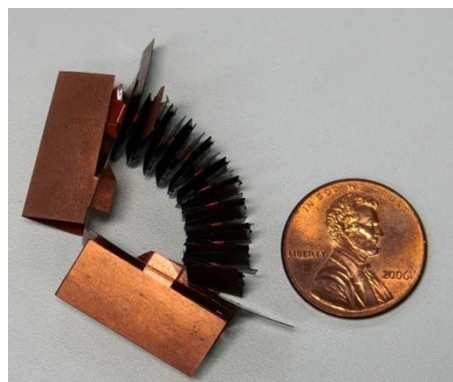


図3 折り紙構造でロボットフレームと一体化して作成できる積層型静電容量センサ (Hara, Nagasawa, Jap. Jour. Appl. Phys. 2021) .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Takumi Ishikawa, Sumito Nagasawa	4. 巻 14
2. 論文標題 SMA micro hand implemented in small robot for generating gestures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Intelligent Service Robotics	6. 最初と最後の頁 399,408
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11370-021-00364-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hara Tomoya, Asamura Kazuto, Nagata Yuya, Nagasawa Sumito	4. 巻 60
2. 論文標題 Stacked electrostatic angle sensor implemented in micro robot leg joints	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SCCL08 ~ SCCL08
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/abe5c0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Asamura Kazuto, Nagasawa Sumito	4. 巻 60
2. 論文標題 A micro hexapod robot for swarm applications assembled from a single FPC sheet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SCCL03 ~ SCCL03
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/abe689	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Asamura Kazuto, Nagasawa Sumito	4. 巻 59
2. 論文標題 MEMS fabrication of compliant sheet for micro hexapod robots	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 S11L03 ~ S11L03
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ab7439	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Takasawa R., Nagasawa S.	4. 巻 59
2. 論文標題 Vibrational communication system in ultrasonic frequency band	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 S11L05 ~ S11L05
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab80e0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 K. Asamura, S. Nagasawa
2. 発表標題 Micro Hexapod Robot for Swarm Applications Assembled from One FPC Sheet
3. 学会等名 33rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Hara, Y. Nagata, S. Nagasawa
2. 発表標題 Stacked Electrostatic Angle Sensor Implemented in Micro Robot Leg Joints
3. 学会等名 33rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Tsuchida, S. Nagasawa
2. 発表標題 Electrostatic Actuator Driven by Commercial Type Wireless Power Supply
3. 学会等名 33rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 児島啓太, 長澤純人
2. 発表標題 形状記憶ポリマーユニットを用いた微細構造物の順序自動組立
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第60 回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金井貴勲, 長澤純人
2. 発表標題 コンプライアントヒンジのモデル化とマイクロロボットへの実装
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Asamura, S. Nagasawa
2. 発表標題 SU-8 Fabrication Process for Micro Hexapod Robot with Wide Joint Ranges
3. 学会等名 32nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Takasawa, S. Nagasawa
2. 発表標題 Study on Vibrational Communication System in Ultrasonic Frequency Band
3. 学会等名 32nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石川拓実, 長澤純人
2. 発表標題 小型ロボット用SMAマイクロ多指ハンドによるジェスチャ生成
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浅村和人, 長澤純人
2. 発表標題 可動ヒートシンク冷却機構による速応答性SMAアクチュエータを用いた小型歩行ロボット
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Sugimoto, S. Nagasawa
2. 発表標題 Micro-Hexapod Robot Having an Origami-like SU-8 Coated Rigid Frame
3. 学会等名 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Hara, S. Nagasawa
2. 発表標題 Sensor and Actuator Double Functional Component for Micro Robot Leg Joints
3. 学会等名 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Kojima, S. Nagasawa
2. 発表標題 Sequential Automatic Assembling Method for Microstructure Using Shape Memory Polymer Units
3. 学会等名 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Shimomoto, S. Nagasawa
2. 発表標題 Continuous Size Classification Device for Marine Microplastics by Pinched Flow Fractionation
3. 学会等名 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 新田雄真, 長澤純人
2. 発表標題 ジェスチャ用マイクロ多指ハンドの小型ロボットへの実装と評価
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第61 回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 富永裕太, 長澤純人
2. 発表標題 自動組立のためのSMAを用いた任意角度の自動折り上げユニット
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第61 回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 闊拓, 長澤純人
2. 発表標題 LiDARを用いたMicro-HexapodへのSLAMの実装
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第61 回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金井貴勲, 長澤純人
2. 発表標題 MEMS 3次元コンプライアントヒンジによるマイクロロボットフレーム
3. 学会等名 日本機械学会関東支部 第28期総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 空真奈花, 長澤純人
2. 発表標題 画素ごとに光学設計したマイクロレンズアレイのdeep RIEによる製作
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 児島啓太, 長澤純人
2. 発表標題 マイクロコンピューターを搭載した構造物の形状記憶ポリマーユニットを用いた順序自動組立
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------